河鲀营养研究进展及展望

廖章斌[1,2]　徐后国[2]　卫育良[2]　梁萌青[2,3*]

(1.上海海洋大学水产与生命学院，上海 201306；2.中国水产科学研究院黄海水产研究所，青岛 266071；3.青岛海洋科学与技术国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 青岛 266071)

摘　要：本文以红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)和暗纹东方鲀(*Takifugu obscurus*)为例，综合了国内外关于河鲀主要营养物质需要量、需求特点的研究进展，从河鲀对蛋白质和氨基酸、脂肪和脂肪酸、碳水化合物、维生素、矿物质以及其他营养物质的需要量或需求特点展开综述，并对下一步相关研究提出展望，以期为河鲀的营养需求及河鲀专用配合饲料的研究开发提供依据和参考。

关键词：红鳍东方鲀；暗纹东方鲀；营养；饲料

中图分类号：S963

河鲀是鲀形目(*Tetraodontiformes*)、鲀科(*Tetraodontidae*)各属鱼类的统称，在我国共有 35 种，自然分布在东海、黄海、渤海等水域。由于河鲀的肉质鲜美、营养丰富，加上其在我国饮食历史中所特有的文化价值，使得河鲀的养殖在我国水产养殖中一直占有重要的地位。目前，在我国河鲀养殖的主要品种为红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)和暗纹东方鲀(*Takifugu obscurus*)，在福建等地区还有一定量的菊黄东方鲀(*Takifugu flavidus*)和双斑东方鲀(*Takifugu bimaculatus*)养殖。河鲀人工繁殖和养殖技术已经比较成熟，但是，其专用的配合饲料却并未广泛普及，部分地区仍利用鲜杂鱼直接投喂，或者是甲鱼、鳗鱼配合饲料与鲜鱼结合投喂等，这些投喂方式皆存在饵料系数偏高、对水质污染严重等问题。随着 2016 年农业部办公厅和国家食品药品监督管理总局联合发布《关于有条件放开养殖红鳍东方鲀和养殖暗纹东方鲀加工经营的通知》，河鲀的养殖和消费量必将迎来大幅增长。因此，河鲀专用配合饲料的开发也成了河鲀养殖业进一步发展的关键。本文旨在以红鳍东方鲀和暗纹东方鲀为例，综述国内外河鲀营养研究进展(表 1)，以期为河鲀营养学研究和专用配合饲料的研发提供依据和

收稿日期：2017–09–16

基金项目：现代农业产业技术体系(CARS-47-G15)

作者简介：廖章斌(1993—)，男，江西吉安人，硕士研究生，研究方向为水产养殖。E-mail: zbliao1@163.com

*通讯作者：梁萌青，研究员，博士生导师，E-mail: liangmq@ysfri.ac.cn

参考。

1 河鲀营养物质需求的研究进展

1.1 蛋白质

蛋白质(氨基酸)是鱼类生长最关键的物质基础，也是水产饲料生产成本中最大的部分。河鲀作为一种偏肉食性的杂食性鱼类，对蛋白质的需求量较高。因此，对河鲀蛋白质及氨基酸需求量的研究是研究河鲀专用饲料和降低生产成本的重要基础。

1.1.1 红鳍东方鲀

河鲀对蛋白质的要求较高，在已有的研究中发现，16~50 g 生长阶段的红鳍东方鲀，其饲料中适宜的粗蛋白质含量为 41.08%[1]。与之相似的是，Kim 等[2]发现红鳍东方鲀幼鱼[初始体重（17.05±0.17） g]在饲料中粗蛋白质含量为 41%时有最好的生长和生理表现。然而，也有研究表明，为使红鳍东方鲀幼鱼(初始平均体重 18.50 g)生长达到最佳状态，饲料粗蛋白质最适含量应该在（50.0±3.7）%[3]。杨州等[4]通过采用以酪蛋白为蛋白质源的试验饲料，以增重率、蛋白质效率等为指标，也发现红鳍东方鲀饲料中最适粗蛋白质含量为 50%。

随着全球鱼粉产量趋于稳定，鱼粉需求量持续增加、价格不断攀升，寻找替代鱼粉的优质蛋白质源日益成为水产养殖业的一个迫切任务。在红鳍东方鲀(初始体重 18 g)试验中，Kikuchi 等[5-6]研究发现，脱脂豆粕中添加适量的贻贝提取物，具备替代 30%~40%鱼粉的潜能；并且，使用 20%脱脂豆粕和 20%贻贝提取物作为蛋白质源替代 40%的鱼粉不会对红鳍东方鲀幼鱼(初始平均体重 11 g)的生长、饲料利用率和健康状况产生负面影响。还有研究发现，饲料中豆粕替代鱼粉比例达 30%时不会对红鳍东方鲀幼鱼(初始平均体重 20.10 g)的生长产生显著影响[7]。

1.1.2 暗纹东方鲀

对暗纹东方鲀，初始体重为（8.56±0.04）g 的幼鱼饲料中粗蛋白质含量为 45.90%~51.60%时，试验鱼幼鱼有较好的增重率、饲料效率和特定生长率[8]。与之相似的是，杨州等[9]结合增重率、蛋白质效率等参数作为综合评价指标得出暗纹东方鲀幼鱼[初始体重(23.60±0.27) g]对饲料粗蛋白质的最适需求量为 46%~49%。Yoo 等[10]在以初始体重为（3.43±0.02） g 的暗纹东方鲀幼鱼为试验对象的研究中发现，饲料中含有粗蛋白质含量为 50%、能量为 18.84 MJ/kg 时，暗纹东方鲀幼鱼具有较好的增重率、饲料效率和特定生长率。但也有研究表明，

在暗纹东方鲀幼鱼[初始体重(12.40±0.11) g]饲料中，粗蛋白质含量为37%~44%时，即可使其具有较好的生长速度[11]。目前来看，针对暗纹东方鲀氨基酸需求的基础数据仍然很少，王平平等[12]研究发现，饲料胱氨酸含量为0.20%时，暗纹东方鲀(8.01~24.60 g)对蛋氨酸的需求量为1.03%。

在对暗纹东方鲀饲料中替代鱼粉的蛋白质源的研究中发现，豆粕、玉米蛋白质粉、发酵豆粕、鱿鱼肝粉都有替代鱼粉的潜力[13-14]。钟国防等[14]发现，当玉米蛋白质粉对暗纹东方鲀饲料中鱼粉的替代水平为10%时，能提高暗纹东方鲀[初始体重(41.26±1.09) g]头肾、脾脏和肝胰脏溶菌酶活力及其c型溶菌酶基因mRNA的表达量。

1.2 脂肪酸和脂肪

脂类物质在鱼类生命代谢过程中具有多种生理功用，是鱼类生长所必需的营养物质。而且，某些不饱和脂肪酸(如：n-3、n-6长链多不饱和脂肪酸)是海水鱼类自身不能合成的，必须依赖于饲料直接提供，才能保证鱼体健康生长。

1.2.1 红鳍东方鲀

Kikuchi等[15]在以初始体重为10 g的红鳍东方鲀幼鱼为研究对象的营养研究试验中发现，饲料中脂肪含量介于5.90%~11.00%时，红鳍东方鲀幼鱼生长、机体状态和饲料利用都有较好的表现。与之结果相似的研究发现，脂肪水平为8.93%的配合饲料对红鳍东方鲀幼鱼[初始体重(7.71±0.15) g]的生长代谢最为有利。并且，投喂该脂肪水平的饲料时，红鳍东方鲀幼鱼体内抗氧化酶活力最高，幼鱼肝脏最为健康，组织结构完整无病变[16-17]。然而，Takii等[18]在以体重约为3.70 g的红鳍东方鲀幼鱼为研究对象的营养研究试验中发现，饲料中脂肪的最适含量为11.50%时，试验鱼具有最高的饲料效率、蛋白质效率和表观蛋白沉积率。

脂肪酸方面，Kikuchi等[19]在以初始体重为5 g的红鳍东方鲀幼鱼为研究对象的营养试验中，设置8组试验，分别为：添加鳕鱼和鱿鱼肝油，3组不同二十二碳六烯酸（DHA）+二十碳五烯酸（EPA）梯度，豆油(及添加DHA和EPA)，亚麻籽油(及添加DHA和EPA)。结果显示，饲料中仅添加亚麻籽油和豆油作为脂肪源会降低试验鱼的生长，在红鳍东方鲀幼鱼饲料中需要添加超过1.50%的n-3长链多不饱和脂肪酸，才能满足红鳍东方鲀幼鱼的正常生长需求。

1.2.2 暗纹东方鲀

Yoo 等[8]在对暗纹东方鲀幼鱼[初始体重(8.32±0.02) g]的研究中发现，当饲料中脂肪含量在 7.01%~8.98%时(以鱼油为脂肪源)，试验鱼能获得最高的生长速度；该研究还发现，当饲料中含有 60%鱼粉时，豆油和亚麻油可 100%替代鱼油而不影响试验鱼[初始体重(10.30±0.03) g]的生长[20]。

1.3　碳水化合物

鱼类主要以蛋白质或脂肪作为能量来源，但碳水化合物同样是鱼类饲料中重要的能源物质，而且还更廉价。当饲料中碳水化合物含量不足或者过高时都会对鱼类的生长发育造成不良影响。因此，在饲料中添加适量的可消化碳水化合物可以减少饲料中粗蛋白质分解，使更多的蛋白质用于鱼类生长，也能减轻氮排泄对养殖水体的污染。同时，合理使用碳水化合物替代一定量的脂肪，还可预防高脂饲料导致的体内脂肪过度累积。

刘襄河等[21-24]对暗纹东方鲀饲料中碳水化合物的功能作用进行了较为系统的研究。在研究饲料糊精水平对暗纹东方鲀幼鱼[初始体重(10.25±0.51) g]生长、饲料利用、消化酶活性和免疫功能的影响时发现，综合生长、饲料利用、消化酶活性、血浆生化和细胞免疫功能等指标来看，暗纹东方鲀幼鱼饲料中适宜的糊精水平为 20%~25%[21]；在研究饲料中玉米淀粉对暗纹东方鲀幼鱼[初始体重(7.90±0.20) g]的影响时发现，添加 23.50%和 22.50%的玉米淀粉能使暗纹东方鲀幼鱼分别获得最快生长和最高饲料利用率[22]；同时还发现，饲料中直链/支链淀粉(AM/AP)值能够显著影响暗纹东方鲀幼鱼[初始体重(7.05±0.05) g]的生长和消化酶活性，且最适比例为 0.25，这非常接近谷物淀粉 AM/AP 值的平均值[23]；在研究饲料中碳水化合物/脂肪(CHO/L)值对暗纹东方鲀幼鱼[初始体重(11.20±0.50) g 生长、血液指标、肝代谢酶活性及磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶(*PEPCK*)基因表达的影响时，用二次多项回归模型分别拟合特定生长率、蛋白质效率、饲料效率与 CHO/L 的关系，得到暗纹东方鲀幼鱼饲料中 CHO/L 的适宜范围为 2.01~2.16[24]。

Takii 等[25]在试验饲料中分别添加 10%、13%、16%、19%和 22%的糊精，结果表明，红鳍东方鲀幼鱼(初始体重约 10 g)饲料中合适的糊精含量约为 16%，此时碳水化合物含量约为 20%。

1.4　维生素

维生素是维持调节鱼类新陈代谢活动，提高鱼类免疫力，促进鱼类快速生长发育所必需

的一类低分子有机化合物。鱼类对维生素需求量虽然很少，但必须由饲料提供。

Kato 等[26]以维生素缺乏症状、生长情况、死亡率以及血液性状等为指标研究了各种水溶性维生素缺乏对红鳍东方鲀幼鱼(平均体重 2.90 g)生长及健康状况的影响，结果发现，红鳍东方鲀幼鱼对胆碱、烟酸、泛酸、维生素 C 及肌醇等与脂肪代谢密切相关的维生素的需求量比其他已知的鱼类要高，对蛋白质代谢相关维生素 B_6 的需求量却相对要低。梁海燕等[27]研究维生素 C 对暗纹东方鲀幼鱼[初始体重(10.28±0.50) g 生长及低温胁迫下免疫应答的影响时发现，综合生长、免疫和抗低温胁迫情况，暗纹东方鲀幼鱼饲料中维生素最适添加量为 88.60 mg/kg。Eo 等[28]的研究则表明，红鳍东方鲀饲料中维生素 C 含量为 29 mg/kg 时即可满足鱼的正常生长和生理需求；饲料中维生素含量为 82~160 mg/kg 时，能提高红鳍东方鲀的非特异性免疫力。

1.5　矿物质

矿物质是保证鱼类正常生长必不可少的一类营养物质，鱼类可以从饲料中摄取矿物元素，也可以利用鳃和皮肤从水中吸收无机盐类，弥补体内矿物质的不足。不过，目前对河鲀矿物质需求量的研究报道仍非常少。

在已有的关于红鳍东方鲀矿物质需求量的研究中发现，饲料中添加多种矿物质混合物，能显著提高红鳍东方鲀幼鱼的生长速度，减少幼鱼畸形。Furuichi 等[29]研究发现，即使是饲料中使用白鱼粉的情况下，矿物质混合物的添加也是必要的。Furuichi 等[30]在对红鳍东方鲀幼鱼钙需求的研究中发现，在鱼粉中添加适量的钙是必要的，钙的添加显著提高了红鳍东方鲀幼鱼的生长速度。Hossain 等[31-32]的研究则发现，在半精制饲料中补充 0.10%~0.20%的钙即可满足试验鱼正常生长和骨骼矿化的需求，过高的钙水平反而会导致骨骼中锌含量降低，影响骨骼矿化。而在 Laining 等[33]对红鳍东方鲀幼鱼(初始体重 9.84 g)饲料中钙磷比(Ca/P)的研究中发现，在饲料中 Ca/P 为 0.50(不额外添加钙)时，再在每千克饲料中添加 2 000 U 肌醇六磷酸酶是最优钙磷使用组合。Ye 等[34]的试验证明，在饲料中添加适量的磷能够提高暗纹东方鲀在冷应激情况下的细胞活力、抗氧化能力、能量产生和脂肪转运能力。

1.6　其他营养物质(诱食剂、免疫增强剂及外源酶等)

梁萌青等[35]在研究中发现，当基础饲料和环境条件相同时，鱼体 RNA/DNA 可作为评价饲料添加剂优劣的指标。在配合饲料中，添加适量的诱食剂可使鱼类在较短的时间内进行

摄食行为，减少饲料消耗。而复合诱食剂中几种不同诱食成分相互组合能起到协同增效的效果，弥补单一诱食成分诱食作用的不足、提高饲料利用率，从而提高水产生物生长和免疫力等。秦巍仑等[36]研究发现，在饲料中添加氧化三甲胺或甜菜碱+丙氨酸+甘氨酸对暗纹东方鲀均具有极显著的诱食作用。梁萌青等[37]比较了不同诱食剂对红鳍东方鲀的诱食效果，诱食活性依次为：蛤蜊提取液＞丙氨酸＞组氨酸＞乌贼内脏液＞核苷酸(ADP)+丙氨酸＞0.5%甜菜碱＞甘氨酸＞石莼提取液＞ADP+甘氨酸+丙氨酸。

华雪铭等[38-39]认为，壳聚糖(0.2%)、益生菌(0.1%)、壳聚糖与益生菌混合物或甘露聚糖与益生菌混合物作为饲料添加剂具有促进暗纹东方鲀生长、增强肠道淀粉酶活性及调节鱼类免疫功能的作用。最近的一项研究则表明，在饲料中添加 2 000 mg/kg 壳寡糖能够促进红鳍东方鲀生长，提高鱼体的非特异性免疫力和肠道消化酶活性并优化红鳍东方鲀的肠道菌群[40]。王永宏等[41]的试验证明，注射(间断和连续)和投喂β–葡聚糖都可提高暗纹东方鲀非特异性免疫力及抗病力，并建议在生产上采用间断给予β–葡聚糖的方式。在外源酶研究方面，孟祥科等[42]的研究结果表明，在红鳍东方鲀饲料中添加 1 000~1 500 U/kg 植酸酶可以促进红鳍东方鲀幼鱼生长、改善消化。Hirazawa 等[43]的研究则发现在红鳍东方鲀饲料中添加辛酸对寄生虫单殖吸虫具有驱虫效果。

1.7　营养物质消化率

在河鲀对饲料及原料的消化率方面，相关数据也不多。吴蓓琦等[44]的研究结果表明，在水温 22~23 ℃时，暗纹东方鲀对饲料的消化率较高，而且暗纹东方鲀对配合饲料中的脂肪的消化率最高，其次为粗蛋白质和碳水化合物。钟国防等[45]研究了暗纹东方鲀对几种蛋白质原料的表观消化率，发现暗纹东方鲀对鱼粉、豆粕和玉米蛋白质粉粗蛋白质和干物质的消化率都较高，粗蛋白质的消化率分别为 93.40%、91.83%和 94.97%，干物质的消化率分别为 88.13%、85.73%和 89.25%。在饲料中添加酶制剂能显著提高暗纹东方鲀对粗蛋白质和干物质的消化率。Yoo 等[13]研究发现，红鱼粉、白鱼粉、发酵豆粕、鱿鱼肝脏粉、羽毛粉、豆粕和磷虾粉的干物质表观消化率分别为 80%、78%、72%、67%、56%、55%及 54%，而相应的粗蛋白质表观消化率分别为 96%、96%、93%、92%、89%、88%及 86%。

1.8　投喂技术

河鲀的最适生长水温为 18~25 ℃。杨城等[46]在研究中发现，在水温 23 ℃条件下，规

格为 3.45~3.56 g 的暗纹东方鲀幼鱼适宜投饵率为 4%。当红鳍东方鲀养殖水温维持在 25 ℃左右，鱼体重小于 100 g 时，适宜放养密度为 60 kg/m^3，每天投喂 3 次即可满足其生长需求。当放养的河鲀大于每尾 100 g 时，喂养频率为每日 1 次，适宜的放养密度为 18 kg/m^3[47]。Kang 等[48]发现，在冬季，水温较低时每天投喂 1 次是冬季暗纹东方鲀养殖经济效益最好的投喂频率。

2 河鲀饲料生产现状

目前我国河鲀营养需求研究与专用配合饲料的生产都严重滞后于养殖生产，成为制约河鲀养殖业进一步发展的瓶颈。虽然目前河鲀产业每年有接近 3 万 t 的养殖产量，但令人吃惊的是，目前尚没有一家大规模的饲料企业生产河鲀专用配合饲料。目前有部分养殖户和养殖企业在河鲀养殖中投喂鲆鲽鱼料、石斑鱼料及甲鱼和鳗鱼的粉料，也有一些大规模的养殖企业(如中洋集团)已尝试自己生产配合饲料。

河鲀饲料产业发展缓慢的原因主要有如下几点：1）缺乏基本营养需求参数的支撑；2）之前国家相关主管部门严控河鲀的生产和流通，饲料企业对河鲀饲料市场的增长缺乏信心；3）养殖户或养殖企业长期以来养成的投喂习惯难以改变，加上养殖体量相对较小，因此养殖环境和病害的压力相对较小，养殖户转变投喂模式的动力不大。

3 小结与展望

综上所述，在河鲀营养研究方面，虽然目前已经具备了一定的研究基础，但是仍然存在以下几方面的不足，有待进一步重点研究：1）基本的营养需求参数方面，氨基酸、脂肪酸和维生素研究数据严重缺乏；2）能在产业中迅速推广应用的鱼粉鱼油替代等实用技术研究也十分缺乏；3）针对不同养殖模式、不同生长阶段的营养学研究目前还没有(目前的研究对象主要集中在初始体重为 7~20 g 的幼鱼)，加上因为河鲀的养殖存在养殖方式多样(工厂化、池塘和外海网箱)、养殖周期中需陆海接力等特点，该领域的营养及投喂技术尤其值得关注。

同时，在河鲀饲料产业发展方面，制约发展的因素正在发生变化。一方面，随着国家有条件放开河鲀的养殖和流通，河鲀产业的发展必将提速，这样势必会有一些中小饲料企业会首先快速进入河鲀饲料市场。另一方面，随着鲜杂鱼价格的不断上涨以及国家对养殖环境污染监管力度的不断加大，加上部分养殖企业中已经监测到了鲜杂鱼投喂导致的病原菌传播和发病率提高，相信养殖户或养殖企业的投喂策略也必将发生变化，从而由鲜杂鱼投喂转向使

用配合饲料。而基础研究方面，随着国家农业产业技术体系海水鱼体系中河鲀营养与饲料岗位的设立，河鲀营养需求参数的全面研究、专用配合地研发和推广也将逐步展开，并助推河鲀饲料产业的发展。

表 1　红鳍东方鲀和暗纹东方鲀的营养研究进展

Table 1　The nutritional research progress of *Takifugu rubripes and Takifugu obscurus*

营养物质 Nutrients	红鳍东方鲀 *Takifugu rubripes*			暗纹东方鲀 *Takifugu obscurus*		
	试验鱼规格 Experimental fish size	简要研究结果 Summary results	参考文献 References	试验鱼规格 Experimental fish size	简要研究结果 Summary results	参考文献 References
粗蛋白质 Crude protein	初始体重（16.03±1.54）g	最适需求量 41.08%(如无特殊说明，评价指标均为"生长"，下同)	王淑敏[1]	初始体重（8.56±0.04）g	最适需求量 45.90%~51.60%	Yoo 等[8]
	初始体重（17.05±0.17）g	最适需求量 41%	Kim 等[2]	初始体重（12.40±0.11）g	基于特定生长率和饲料利用效率，最适需求量分别为 37%和 40%	Ye 等[11]
	初始平均体重 18.50 g	最适需求量（50.0±3.7）%	朱钦龙[3]			
	初始平均体重约 10 g	最适需求量 50%	杨州等[4]			
蛋氨酸 Methionine				初始体重 8.01~24.60 g	最适需求量 1.03%	王平平等[12]
豆粕 Soybean meals	初始体重 18.00 或 2.00 g	添加贻贝提取物可提高豆粕	Kikuchi 等[5-6]			

		替代量	
	初始体重 20.10 g	替代 30%鱼粉(31.50%鱼粉+20.20%豆粕)不影响生长	Lim 等[7]
玉米蛋白质粉 Corn gluten meal	初始体重（41.26±1.09）g	替代鱼粉水平为 10%时，能提高头肾、脾脏和肝胰脏溶菌酶活力及其 c 型溶菌酶基因 mRNA 的相对表达量	钟国防等[14]
蛋白质表观消化率 Apparent digestibility coefficient of protein	初始体重（10.80±0.04）g	蛋白源消化率由高到低为：红鱼粉、白鱼粉、发酵豆粕、鱿鱼内脏粉、羽毛粉、豆粕、磷虾粉。豆粕和羽毛粉组生长受到抑制	Yoo 等[13]
	初始体重（75.54±3.34）g 体长（13.12±1.63） cm	鱼粉、豆粕和玉米蛋白粉蛋白质和干物质的消化率都较高，干物质的消化率分别为 88.13%、85.73% 和 89.25%	钟国防等[46]

氮能比 Nitrogen to energy ratio				初始体重（3.43±0.02）g	最适氮能比为粗蛋白质含量为 50%，能量为 18.84 MJ/kg	Yoo 等[10]
脂肪 Lipids	初始平均体重 10 g	最适需求量为 5.90%~11.00%	Kikuchi 等[15]	初始体重（8.32±0.02）g	最适需求量为 7.01%~8.98%	Yoo 等[8]
	初始体重(7.71±0.15) g	最适需求量 8.93%	孙阳等[16-17]			
	初始体重大约 3.70 g	最适需求量 11.50%	Takii 等[18]			
脂肪酸 Fatty acids	初始平均体重 18.70 g	实验设计：3 个不同的 DHA+EPA 梯度、豆油(及添加 DHA 和 EPA)、亚麻油(及添加 DHA 和 EPA)：饲料中需要 1.50%的 n-3 长链多不饱和脂肪酸，仅添加豆油和亚麻油都降低生长	Kikuchi 等[19]			
脂肪源 Lipid sources				初始体重（10.30±0.03）g	在饲料中含有 60%鱼粉的时候，豆油和亚麻油可以 100%替代鱼油而不影响生长	Yoo 等[20]

碳　水　化　合　物 Carbohydrates	初始体重约 10 g	合适的糊精水平约为 16%，此时碳水化合物含量约为 20%	Takii 等[25]	初始体重（7.90±0.20）g	玉米淀粉最适添加量为 22.50%~23.50%	Liu 等[22]
				初始体重（10.25±0.51）g	糊精的适宜添加水平为 20%~25%	刘襄河等[21]
直链淀粉和支链淀粉比例 AM to AP ratio				初始体重（7.05±0.05）g	6/19 时，有最好的生长和饲料利用	Liu 等[23]
维生素 Vitamins	初始平均体重 2.90 g	维生素 B6 等蛋白质代谢相关维生素需求量低而脂肪代谢相关维生素如胆碱、烟酸、生物素和肌醇需求量高	Kato 等[26]			
维生素 C Vitamin C	初始体重 35.00 g	以生长指标评价最适需求量为 29 mg/kg，超过 82 mg/kg 可增强免疫力	Eo 等[28]	初始体重（10.28±0.50）g	最适添加量为 88.60 mg/kg	梁海燕等[27]
多矿 Multi-minerals	初始平均体重 1.80 g	即使使用白鱼粉也需要额外添加多矿。	Furuichi 等[29]			

	初始体重（1.30±0.10）g 和（1.70±0.10） g	即使使用白鱼粉也需要额外添加钙	Furuichi 等[30]			
钙 Calcium	平均初始体重 1.60 g	半精制饲料中需要添加 0.20%的乳酸钙；对海水中钙不能有效利用；磷酸三钙的形式反而抑制生长	Hossain 等[31]			
钙 Calcium	初始平均体重 1.00 g	半精制饲料中添加 0.10%~0.20%的钙能提高生长和饲料利用	Hossain 等[32]			
钙磷比 Ca to P ratio	初始平均体重 9.84 g	不添加钙的情况下，最适钙磷比为 0.50(添加 2 000 U/kg 的植酸酶使用效果最佳)	Laining 等[33]			
磷 Phosphorus				初始体重（11.92±0.19） g	添加适量的磷能提高试验鱼在冷应激情况下的细胞活力、抗氧化能力、能量产生和脂肪转运能力	Ye 等[34]

诱食剂 Feeding attraction	体长 7~10 cm	诱食性由高到低依次为：蛤蜊提取液>丙氨酸>组氨酸>乌贼内脏液>ADP+丙氨酸>0.50%甜菜碱>甘氨酸>石莼提取液>ADP+甘氨酸+丙氨酸	梁萌青等[35]	体长 20~25 cm	氧化三甲胺或甜菜碱+丙氨酸+甘氨酸均具有极显著的诱食作用	秦巍仑等[36]
壳寡糖 Chitosan	初始体重(129.20±3.10) g	0.10%~0.02%壳寡糖提高生长，改善肠道微生态	Su 等[40]	初始体重（3.15±0.05）g	饲料中添加 0.20%的壳聚糖、0.10%的益生菌促生长作用最明显，相对增重率显著提高	华雪铭等[38]
B－葡聚糖 β-glucan				初始体重约 50.00 g	注射(间断和连续)和投喂β-葡聚糖都可提高非特异性免疫力及抗病力	王永宏等[41]
植酸酶 Phytase	初始体重(4.58±0.05) g	建议植酸酶的适宜添加量为 1 000~1 500 U/kg	孟祥科等[42]			
辛酸 Caprylic acid	初始体重 100.00~150.00 g	对寄生虫单殖吸虫具有驱虫效果	Hirazawa 等[43]			

配合饲料消化率 Digestibility of formulated feed				初始体重约 100.00 g	配合饲料中脂肪的消化率最高，其次为粗蛋白质、碳水化合物	吴蓓琦等[44]
投饵率 Feeding rate				初始体重 3.45~3.56 g	适宜投饵率为 4%	杨城等[46]
投饲频率 Feeding frequency	初始体重 100 g 以下	每天 3 次(结合养殖密度和温度考虑)	Kikuchi 等[47]	初始体重 15.00 g	冬天水温低时每天投饵 1 次经济效益最佳	Kang 等[48]
	初始体重 100 g 以上	每天 1 次(结合养殖密度和温度考虑)				

参考文献：

[1] 王淑敏.红鳍东方鲀幼鱼饲料最适蛋白质含量的研究[D].硕士学位论文.石家庄:河北师范大学,2008:14–27.

[2] KIM S S,LEE K J.Dietary protein requirement of juvenile tiger puffer(*Takifugu rubripes*)[J].Aquaculture,2009,287(1/2):219–222.

[3] 朱钦龙.红鳍东方鲀(稚鱼)饲料的最适蛋白质含量[J].江西饲料,2003(3):41.

[4] 杨州,杨家新.河鲀营养需求与饲料应用概况[J].水利渔业,2002,22(1):1–2.

[5] KIKUCHI K,FURUTA T.Inclusion of blue mussel extract in diets based on fish and soybean meals for tiger puffer *Takifugu rubripes*[J].Fisheries Science,2009,75(1):183–189.

[6] KIKUCHI K,FURUTA T.Use of defatted soybean meal and blue mussel meat as substitute for fish meal in the diet of tiger puffer,*Takifugu rubripes*[J].Journal of the World Aquaculture Society,2009,40(4):472–482.

[7] LIM S J,KIM S S,KO G Y,et al.Fish meal replacement by soybean meal in diets for tiger puffer,*Takifugu rubripes*[J].Aquaculture,2011,313(1/2/3/4):165–170.

[8] YOO G,YUN H,BAI S C.Optimum dietary protein level in juvenile river puffer *Takifugu obscurus*[J].Journal of Fisheries and Marine Sciences Education,2014,26(4):859–867.

[9] 杨州,杨家新.暗纹东方鲀幼鱼对蛋白质的最适需要量[J].水产学报,2003,27(5):450–455.

[10] YOO G,BAI S C.Evaluation of the optimum dietary protein to energy ratio in juvenile river puffer *Takifutu obscurus*[J].Journal of Fisheries and Marine Sciences Education,2014,26(4):868–876.

[11] YE C X,WU Y L,SUN Z Z,et al.Dietary protein requirement of juvenile obscure puffer,*Takifutu obscurus*[J].Aquaculture Research,2017,48(5):2064–2073.

[12] 王平平,王安利,叶超霞,等.暗纹东方鲀幼鱼蛋氨酸需求量的研究[C]//第九届世界华人鱼虾营养学术研讨会论文集.厦门:第九届世界华人鱼虾营养学术研讨会,2013.

[13] YOO G,BAI S C.Effects of different dietary protein sources on apparent digestibility and growth in juvenile river puffer *Takifutu obscurus*[J].Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,2014,47(4):383–389.

[14] 钟国防,周洪琪,钱曦,等.玉米蛋白粉替代鱼粉对暗纹东方鲀溶菌酶活性及 c 型溶菌酶 mRNA 表达的影响[J].水产学报,2010,34(7):1121–1128.

[15] KIKUCHI K,FURUTA T,IWATA N,et al.Effect of dietary lipid levels on the growth,feed utilization,body composition and blood characteristics of tiger puffer *Takifugu rubripes*[J].Aquaculture,2009,298(1/2):111–117.

[16] 孙阳,姜志强,李艳秋,等.饲料脂肪水平对红鳍东方鲀幼鱼生长、体组成及血液指标的影响[J].天津农学院学报,2013,20(3):14–18.

[17] 孙阳,姜志强,李艳秋,等.饲料脂肪水平对红鳍东方鲀幼鱼肝脏抗氧化酶活力及组织结构的影响[J].广东海洋大学学报,2013,33(3):27–32.

[18] TAKII K,UKAWA M,NAKAMURA M,et al.Suitable lipid level in brown fish meal diet for tiger puffer[J].Fisheries Science,1995,61(5):841–844.

[19] KIKUCHI K,FURUTA T,IWATA N,et al.Effect of dietary fatty acid composition on the growth of the tiger puffer *Takifugu rubripes*[J].Fisheries Science,2011,77(5):829–837.

[20] YOO G,BAI S C.Effects of Dietary lipid sources and essential fatty acids on the growth and body composition of the juvenile river puffer fish *Takifugu obscurus*[J].Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,2014,47(4):390–398.

[21] 刘襄河,王安利,叶超霞,等.饲料糊精水平对暗纹东方鲀幼鱼生长、消化酶活性和血液生化指标的影响[J].水产学报,2013,37(9):1359–1368.

[22] LIU X H,YE C X,ZHENG L M,et al.Dietary maize starch influences growth performance,apparent digestibility coefficient,and hepatic enzyme activities of carbohydrate metabolism in obscure puffer,*Takifutu obscurus* (Abe)[J].Journal of the World Aquaculture Society,2015,46(1):102–113.

[23] LIU X H,YE C X,YE J D,et al.Effects of dietary amylose/amylopectin ratio on gro wth performance,feed utilization,digestive enzymes,and postprandial metabolic responses in juvenile obscure puffer *Takifutu obscurus*[J].Fish Physiology and Biochemistry,2014, 40(5):1423–1436.

[24] 刘襄河,叶超霞,沈碧端,等.饲料中糖/脂肪比对暗纹东方鲀幼鱼生长、血液指标、肝代谢

酶活性及 *PEPCK* 基因表达的影响[J].水产学报,2014,38(8):1149–1158.

[25] TAKII K,UKAWA M,NAKAMURA M,et al.Suitable sugar level in brown fish meal diet or tiger puffer[J].Fisheries Science,1995,61(5):837–840.

[26] KATO K,ISHIBASHI Y,MURATA O,et al.Qualitative water-soluble vitamin requirements of tiger puffer[J].Fisheries Science,1994,60(5):589–596.

[27] 梁海燕,叶超霞,王安利.维生素 C 对暗纹东方鲀生长及低温胁迫下免疫应答的影响[C]//第九届世界华人鱼虾营养学术研讨会论文集.厦门:中国水产学会,2013.

[28] EO J,LEE K J.Effect of dietary ascorbic acid on growth and non-specific immune responses of tiger puffer,*Takifugu rubripes*[J].Fish & Shellfish Immunology,2008,25(5):611–616.

[29] FURUICHI M,FURUSHO Y,MATSUI S,et al.Essentiality of mineral mixture supplement to white fish meal diet for tiger puffer[J].Journal of the Faculty of Agriculture,Kyushu University,1997,42(1):77–85.

[30] FURUICHI M,FURUSHO Y,HOSSAIN M A,et al.Essentiality of Ca supplement to white fish meal diet for tiger puffer[J].Journal of the Faculty of Agriculture,Kyushu University,1997,42(1):69–76.

[31] HOSSAIN M A,FURUICHI M.Availability of environmental and dietary calcium in tiger puffer[J].Aquaculture International,1998,6(2):121–132.

[32] HOSSAIN M A,FURUICHI M.Calcium requirement of tiger puffer fed a semi-purified diet[J].Aquaculture International,1999,7(5):287–293.

[33] LAINING A,ISHIKAWA M,KYAW K,et al.Dietary calcium/phosphorus ratio influences the efficacy of microbial phytase on growth,mineral digestibility and vertebral mineralization in juvenile tiger puffer,*Takifugu rubripes*[J].Aquaculture Nutrition,2011,17(3):267–277.

[34] YE C X,WAN F,SUN Z Z,et al.Effect of phosphorus supplementation on cell viability,anti-oxidative capacity and comparative proteomic profiles of puffer fish (*Takifutu obscurus*)under low temperature stress[J].Aquaculture,2016,452:200–208.

[35] 梁萌青,王成刚,陈超,等.几种添加剂对红鳍东方鲀的促生长效果与 RNA/DNA 关系[J].海洋水产研究,2001,22(2):38–41.

[36] 秦巍仑,秦桂祥,谢德友,等.不同诱食剂对暗纹东方鲀鱼种诱食效果的比较[J].水产养殖,2013,34(4):4–7.

[37] 梁萌青,于宏,常青,等.不同诱食剂对 3 种鱼类诱食活性的研究[J].中国水产科学,2000,7(1):60–63.

[38] 华雪铭,周洪琪,张宇峰,等.饲料中添加壳聚糖和益生菌对暗纹东方鲀幼鱼生长及部分消化酶活性的影响[J].水生生物学报,2005,29(3):299–305.

[39] 华雪铭,周洪琪,张冬青,等.多糖和益生菌对暗纹东方鲀免疫功能的调节[J].水产学报,2006,30(2):230–235.

[40] SU P,HAN Y,JIANG C,et al.Effects of chitosan-oligosaccharides on growth performance,digestive enzyme and intestinal bacterial flora of tiger puffer (*Takifugu rubripes*)[J].Journal of Applied Ichthyology,2017,33(3):458–467.

[41] 王永宏,杨小玉,郭正龙,等.β－葡聚糖对暗纹东方鲀幼鱼非特异性免疫及生长性能的影响[J].中国水产科学,2013,20(6):1247–1256.

[42] 孟祥科,孙阳,屈菲,等.植酸酶对红鳍东方鲀幼鱼生长、消化酶及消化率的影响[J].大连海洋大学学报,2013,28(4):323–328.

[43] HIRAZAWA N,OHTAKA T,HATA K.Challenge trials on the anthelmintic effect of drugs and natural agents against the monogenean *Heterobothrium okamotoi* in the tiger puffer *Takifugu rubripes*[J].Aquaculture,2000,188(1/2):1–13.

[44] 吴蓓琦,沈美芳,殷悦,等.暗纹东方鲀对配合饲料表观消化率的初步研究[J].水产养殖,2000(1):22–23.

[45] 钟国防,韩斌,华雪铭,等.暗纹东方鲀对几种蛋白质原料表观消化率及酶制剂对其消化能力的影响[J].上海海洋大学学报,2012,21(2):241–246.

[46] 杨城,袁重桂,阮成旭,等.不同投饵率对暗纹东方鲀幼鱼生长的影响[J].福建水产,2012,34(2):160–162.

[47] KIKUCHI K,IWATA N,KAWABATA T,et al.Effect of feeding frequency,water temperature,and stocking density on the growth of tiger puffer,*Takifugu rubripes*[J].Journal of the World Aquaculture Society,2006,37(1):12–20.

[48] KANG H W,CHO J K,SON M H,et al.Effect of feeding frequency on growth and body composition of juvenile river puffer,*Takifutu obscurus* in winter season[J].Journal of Fisheries and Marine Sciences Education,2015,27(3):718–724.

Progress and Outlook in Nutrition Study on Puffers

LIAO Zhangbin[1,2] XU Houguo[2] WEI Yuliang[2] LIANG Mengqing[2,3*]

(1. *College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai OceanUniversity, Shanghai* 201306, *China*; 2. *Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao* 266071, *China*; 3. *Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao* 266071, *China*)

Abstract: Taking *Takifugu rubripes* and *Takifugu obscurus* as representative species, this review summarized the research progress in nutrient requirements and nutritional characteristics of puffers, including those about amino acids and protein, fatty acids and lipids, carbohydrates, vitamins, minerals, and other important nutrients. Outlooks were also made in this research area, in order to provide new insights into the nutrition study and feed development for puffers.

Key words: *Takifugu rubripes*; *Takifugu obscurus*; nutrition; feed

*Corresponding author, professor, E-mail: liangmq@ysfri.ac.cn (责任编辑　田艳明)